УДК 550.831+550.312

# Об особенностях 4D гравитационного мониторинга геологической среды

***© Ю.И. Дубовенко, О.А. Черная, 2010***

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила _____ _____________ 2010 г.

*Представлено академиком НАН Украины В.И. Старостенко*

Определено понятие и особенности 4D гравитационного мониторинга. Обработку его данных на коротких профилях предложено производить по соотношениям с быстро убывающими ядрами, а вариации гравиполя из-за влияния малоинтенсивных геофизических факторов учитывать по методике Двулита.

A notion and peculiarities of 4D gravity monitoring are defined. Its data processing on the short profiles is offered to execute by the given expressions with fast decaying cores, and gravity fluctuations due to impact of small intensive geophysical one should take into account by the Dvulit's techniques.

**1. К обоснованию мониторинга.** На фоне очевидного глобального технологического прогресса в условиях экономического спада на количество, методику и возможности осуществления крупномасштабных геофизических работ влияют две тенденции. С одной стороны – возросшая точность и производительность гравиметрических сьемок (этот метод при приемлемой точности остается недорогим поисково-разведочным решением в общем комплексе геофизических исследований вследствие совершенствования аппаратуры и топогеодезического обеспечения – систем GPS). С другой стороны заметно резкое снижение обьема измерений.

Первое повлекло за собой необходимость пересмотра методов обработки полученных данных, в частности, более точный учет поправок Буге [Бычков, 2007]. Последнее, на фоне необходимости обнаружения более глубинных источников аномалий[1], влечет за собой пересмотр методики измерений с целью учета тонких особенностей гравитационных аномалий „малой кровью”, т.е. без усложнения математического аппарата, методик измерений и увеличения материально-технических затрат. Эти особенности можно „подсечь”, если задействовать дополнительную переменную – время.

В этом плане мировые „тренды” геофизических наблюдений постепенно тяготеют к непрерывному 4D мониторингу [Battaglia et al., 2008] исследуемой площади, изучая эволюцию гравитационного поля за время эсплуатации участка либо на протяжении интервала его резкой динамической активизации. Следует подчеркнуть, что в западной литературе [Geophysics, 2008] под термином „вариации силы тяжести” имеют в виду временную разность реальных аномалий на *ограниченных* площадях, источниками которых выступают обьекты с быстроизменяемой глубинной динамикой, в то время как в отечественной литературе за этим понятием зарезервированы слабые квазипериодические флуктуации на *сверхдлинных* профилях, пересекающих области контрастных современных вертикальных движений блоков земной коры.

Сама идея мониторинга уже витала в воздухе [Лоссовский, 2006][2] и некоторые ее приложения в определенной степени иллюстрирует работа [Юргин, 2006]. Тем не менее, в указанных источниках не упоминается о необходимой, по нашему мнению, подоплеке мониторинга – вариациях силы тяжести в том понимании, которое в них заложено работами Г.Т. Собакаря, и их зависимости от ряда малоинтенсивных природных и техногенных факторов.

Применение *повторных* наблюдений в некоторой области в гравиметрии для нас сравнительно неново (его элементы применялись в создании региональных плотностных моделей Кавказа, о чем упоминается в [Алексидзе, 1985], а также см. [Юркина, 1978]), хотя *непрерывными* во времени их назвать трудно, в то время как в сейсмометрии это давно – общепринятая практика.

Отметим, что при организации любых высокоточных измерений, в которых сила тяжести

---

[1] Возможности методов регуляризации в решении задач построения сложных разрезов при современном уровне модельных представлений о геологической среде близки к технологическому пределу.

[2] С.82 – „...если современные физико-математические теории строят и исследуют свои функциональные связи и последующие смысловые ряды на территории преимущественно *пространства*, то эксперимент зондирует пока еще не подвластное теории *время*”.

– отдельный параметр, ее изменение следует обязательно исследовать и учитывать [Собакарь, 1972].

**2. О вариациях силы тяжести.** В [Собакар, 1972] впервые в отечественной литературе проанализированы различные составляющие вариативной части гравитационного поля и выделены неприливные квазипериодические вариации (КПВ) силы тяжести (с аплитудой в пределах 3-5-кратной погрешности измерений). Для их измерений была создана новая методологическая (неоднородная модель Земли как в физико-химическом, так и в энергетическом плане), методическая (КПВ максимальны при пересечении разновозрастных тектонических структур и в областях контрастных современных вертикальных движений) и метрологическая (наблюдения на сети оптимальной плотности и конфигурации несколькими приборами с высоким коэффициентом надежности и сравнение градиентов КПВ и наблюденных аномалий) база.

Сами КПВ очевидно тесно связаны с эндогенными процессами формирования и развития плотностных неоднородностей земной коры и мантии, хотя не исчерпываются ими. В ходе перераспределения вещества внутри Земли меняется ее момент инерции, а как следствие – ротационный режим, и с ним сила тяжести. При этом перераспределении нарушается фигура равновесия Земли, что изменяет силу тяжести. В ходе изостатического восстановления фигуры равновесия сила тяжести снова меняется. Эта гамма процессов и генерирует КПВ силы тяжести Земли. Обратимая часть процессов создает периодическую часть вариаций, а необратимая часть – непериодическую часть вариаций, которая и формирует стационарное гравитационное поле Земли (гравианомалии).

Отмечена [Лубков, 2010] корреляция крупномасштабных плотностных неоднородностей мантии и приливных параметров Земли, характеризирующих ее приливное деформирование. Сами приливные параметры (т.наз. числа Лява и Шида) находят на основе расчета релаксационных амплитуд гравипотенциала на поверхности Земли и ее ядра. В связи с этим возможно наличие кросскореляции КПВ и упомянутых динамических параметров Земли, что требует отдельного изучения.

Невзирая на слабую интенсивность, аномалии КПВ силы тяжести выявляют вполне уверенно вследствие особенностей поведения временной кривой КПВ и тесной обратнопропорциональной корреляции с кривыми вертикальных движений земной коры. Последнюю считают [Собакарь, 1972] следствием общности процессов в верхней мантии, влияющих на КПВ и вертикальные движения. Суммарная величина КПВ является суммой суперпозиций вариаций различного происхождения, знака, периода и апмлитуды. Эта суммарная амплитуда в конечном итоге и определяет эволюцию гравитационного поля Земли, вызванную эволюцией неоднородностей ее коры и верхней мантии.

Ввиду сказанного, вариации силы тяжести следует учитывать в интерпретации результатов 4D гравиметрии – с целью введения соответствующих поправок в гравитационные съемки разных лет, в долговременную прецизионную топосьемку, уточнения реологии исследуемого участка и др.

**3. Основа мониторинга.** Определим основные понятия. Назовем *гравитационным мониторингом* ряд *периодически* повторяемых в реальном времени *непрерывных* на протяжении фиксированного временного отрезка (рис. 1) микрогравиметрических измерений гравитационного поля и обработку его данных с учетом *влияния* окружающей среды и сферы применения.

Величина временного отрезка зависит от качества измерений, меры неопределенности результатов наблюдений, динамики (амплитуды и частоты) поля.

Физической основой гравиметрического мониторинга является непрерывная связь динамики гравитационного поля и параметров среды – ундуляциям сантиметрового диапазона отвечают вариации силы тяжести в несколько мГал. Если деформация дневного рельефа определенного участка есть прямым следствием приповерхностного распределения масс, гравитационный мониторинг можно применять для исследования разуплотнения и флюидного режима этого участка.

Пространственное распределение вариаций вертикальной производной $V_z$ потенциала си-

лы тяжести *прямо коррелирует* с площадным распределением плотностей, а временные вариации $V_z$ четко определяют вертикальные вариации насыщения флюидов.

Аппаратная основа мониторинга среды представляет собой совместные крупномасштабные измерения превышений рельефа по данным GPS и абсолютных значений силы тяжести (сотни стационарных пунктов на сотни км$^2$). Значительно дешевле обходится гравиметрия с относительным учетом силы тяжести, но ей присущи серьезные ограничения – привязка к опорной сети и необходимость синхронного учета „сползания нуля". Тем не менее, в наших условиях именно такие измерения при надлежащем методическом обеспечении имеют наибольшую перспективу. На некоторых участках возможно применять непрерывные измерения силы тяжести в скважинах, преобладающие в разрешающей способности наземную съемку благодаря большей близости к источникам и устранению приповерхностных влияний. Для компенсации влияния температуры и других внешних факторов используют некоторые наработки из аппаратурной базы морской гравиметрии.

**4. О выделении слабого сигнала.** В целом, в исследованиях, посвященных 4D гравимониторингу [Geophysics, 2008] , отмечена амплитуда сигнала в диапазоне от 20 мГл [Williams-Jones, 2008] до 80 мГл [Gettings, 2008]. В границах действующих вулканов амплитуда сигнала возрастает до 300-600 мГл, а в пределах водных бассейнов ~ 200-250 мГл [Davis et al., 2008] при нелинейном учете „сползания нуля". Вследствие повторяемости измерений, фиксирующей невязку значений силы тяжести в точке наблюдений, можно оценить точность определения полезного сигнала на временном отрезке.

С целью выделения слабого сигнала на фоне помех в гравиметрии применяют методы корреляционного анализа и вычисление некоторых составляющих градиентов по прямым измерениям силы тяжести[3]. Авторы [Battaglia et al., 2008] выделяют полезный сигнал путем расчета разностной аномалии $\Delta g_d = \Delta g_m - \gamma h_z - \Delta g_{def} - \Delta g_w$, где $\Delta$ – разность между двумя соседними отсчетами во времени, $\gamma = -308.6$ мГал/м – поправка в свободном воздухе, $h_z$ – вертикальное смещение (относительное поднятие-опускание), $\Delta g_{def}$ – аномалия Буге деформации (вклад от изменения обьема из-за сжатия среды вокруг источника, что подразумевает смещение плотностных границ в неоднородной среде); $\Delta g_w = 2\pi G \rho_w \varphi \delta_z = 42 \varphi \delta_z$ – влияние грунтовых вод (действие гидротермального фактора). Кроме того, используется привязка к независимым наблюдениям на контрольном пункте, расположенном вблизи исследуемого участка.

Опеределенные улучшения слабого сигнала на фоне помех получают и путем статистической фильтрации влияния температурных флуктаций с помощью алгоритмов с нечеткой логикой [Andò, Carbone, 2004]. Если не хватает длины ряда наблюдений, используют полиномиальную аппроксимацию низкого порядка [Bonvalot et al., 1998] с соответствующей „калибровкой" порядка полинома. Кроме того, используют сравнение результата фильтрации с данными, полученными с близко расположенного контрольного пункта от участка наблюдений.

Примечательно, что как и в случае измерений КПВ силы тяжести, многие авторы из [Geophysics, 2008] отмечают корреляцию слабого сигнала с вертикальными подвижками и, предполагая разночастотность напряженности поля силы тяжести и вариаций помех, применяют для усиления полезного сигнала частотную фильтрацию. Аналогию можно усмотреть опять же в морской гравиметрии. На равнинных участках сигнал имеет малый градиент, и такой подход, по нашему мнению, малоэффективен. В таком случае нужно учитывать влияние помех иными методами – изменением геометрии сети наблюдений, временной фильтрацией, вычислением производных и т.п., предлагаемыми в [Собакарь, 1972].

**5. О методике мониторинга.** Выскажем некоторые соображения об организации мониторинга. Его методическую сторону, видимо, целесообразно основывать на достижениях

[3] Точно так же как в морской гравимерической сьемке применяют вычисление вертикальных и горизонтальных градиентов силы тяжести и их комплексную интерпретацию.Эта методика интерпретации опробована на морских нефтегазовых структурах [Юргин, 2006].

[Собакарь, 1972], а изучение метрологических нюансов – на примере геодинамическкого полигона с готовой инфраструктурой и базой геофизических измерений (например, одного из использованных в исследованиях [Двуліт, 1999]). Так, для мониторинга условного месторождения необходима сеть детальной рядовой сьемки масштаба 1:10000 на ровном полигоне 10×10 км$^2$ по стандартной методике с минимумом опорных пунктов [Гравиразведка…, 1990, с. 106]: 21 профиль (по 20 точек с шагом 50 м) с контролем 30% от общего количества рядовых точек (свыше 13 тыс. пунктов измерений). Организация полигона и наблюдения на указанной сети за месяц обойдутся в ~ 100 тыс. грн, без учета стоимости и аммортизации аппаратуры и других накладных расходов.

Недостаток инфраструктуры и оборудования увеличит затраты на организацию мониторингового полигона на неопределенную стоимость. Использование цифровой регистрации позволит за счет упрощения схемы сьемок обойти некоторые трудности в начальных этапах сьемки и ускорить создание цифровой модели обьекта. Выход из финансово-технологического тупика – сотрудничество разных институтов с совместным использованием инструментария, персонала, методик и общим планом исследований на общем обьекте (этим путем интегрированного мониторинга (collaborative gravity network) идут многие западные компании).

Следует отметить, что применение классической схемы измерений на *регулярной* сети пунктов и последующий перерасчет значений по известному интегралу Пуассона пригодно для региональных исследований [Davis et al., 2008], но в локальных условиях, где чаще всего применяют гравимониторинг [Болотнова, 2007], имеет ряд недостатков [Дубовенко, 2002]. К тому же, иногда по ряду причин организация регулярной сети невозможна, а пересчет из нерегулярной сети на регулярную является задачей более сложного порядка, чем обратное восстановление строения среды по данным измерений.

Решение обратных задач гравиметрии с данными в псевдорегулярных сетях с применением моделей среды типа „бесконечный профиль” приводит к появлению плохо обусловленных систем линейных уравнений, генерирующих бессодержательные результаты. Ввиду этого, и исходя из преимущественно краткой длины реальных профилей, целесообразен альтернативный подход.

Для интерпретации измерений на коротких профилях предложена [Дубовенко, 2002] система линейных интегральных уравнений с быстро убывающими ядрами:

$$S_{n+1}^{+}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{+}(\xi)\left(\cosh\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{+}(x),$$

$$S_{n+1}^{-}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{-}(\xi)\left(\tanh\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{-}(x)$$

$$\zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x)=v(x),\ \zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x),\ n=\overline{0,\infty}.$$

С учетом этого методика, изложенная в [Болотнова, 2007] остается действенной в определенных условиях (региональный фон – полином 1-й степени; известны *плотности* и *положения* границ тяготеющих тел на поверхности; эти тела близки или имеют общие контакты). Она, в частности, предполагает построение пространственной плотностной модели среды в 3 этапа: разделение аномалий от тяготеющих тел и определение *эффективных* глубин их залегания и квазиплотности (нулевое приближение), определение *истинных* глубин и плотностей тел по решению плоской обратной задачи (первое приближение) и окончательное решение в среде ADG-3D.

Нами предлагается в методике [Болотнова, 2007] использовать программный комплекс [Старостенко и др., 2004], разработанный на основе [Старостенко, Легостаева, 1998], и подборку программ, полученную в исследовании [Дубовенко, 2002].

**6. К интерпретации данных.** Целью мониторинга является оценка глубины к источнику аномалий и изменения объема по данным деформации рельефа требует знания приповерхностного распределения масс (по данным гравиметрии). Деформации земной поверхности получают по данным спутниковой геодезии GPS, имеющих ряд преимуществ перед традицион-

ными геодезическими методами[4]. Приповерхностные неоднородности строения среды (карсты, плавуны, зоны обводнения и разуплотнения), сложная структура площади (складчатость, солянокупольная тектоника, разломы), факторы поглощения полезного сигнала (температура, инструментальные влияния) ограничивают эффетивность мониторинга, не снижая его практического значения.

В [Battaglia et al., 2008; Davis et al., 2008] не учтена особенность вариаций гравитационного поля: колебания величины его производных зависят от флуктуаций малоинтенсивных геофизических факторов (аномальных атмосферных масс (рис. 2), снеговых масс, уровня грунтовых вод, лесистости и изменений рельефа (рис. 3) вследствие техногенной деятельности [Двуліт, 1999]. Учитывать эти эффекты можно путем внесения соответствующих поправок при решении прямых задач гравиметрии на исследуемых территориях (предполагается, что вследствие длительного мониторинга участка приблизительно известно его строение).

К примеру, влияние притяжения атмосферных масс в центральной сферической зоне (сферическая трапеция 1°×1°) вокруг пункта наблюдений на величину гравитационного поля определяет формула [Двуліт, 1999] $\delta g_0 = 0.269\,\Delta P$, где $\Delta P$ – аномалия атмосферного давления; влияние снеговых масс в той же центральной зоне равно $\delta g_0 = -2\pi f\sigma$, где $\sigma$ – плотность снега; влияние уровня грунтовых вод на вариации $\Delta g$ учитывает формула $\delta g \cong 2\pi f\sigma h$, где $h$ – амплитуда колебания уровня вод; и, наконец, техногенное изменение рельефа – соотношение $\delta g = \gamma \cdot \Delta h / L$, где $\Delta h$ – превышение между пунктами наблюдений за 1 год, $L$ – расстояние между пунктами.

Необоснованное упрощение аналитических моделей среды с целью снижения неоднозначности истолкования во многих случаях является причиной неверных результатов вычислений геометрии источников, вертикального и латерального распределения плотностных неоднородностей, особенно в случаях, когда среда вокруг аномального источника далека от предположений об однородности. Надежное количественное истолкование динамики масс, например, в мониторинге месторождений углеводородов получают при *известной геометрии* тяготеющих тел (по данным сейсморазведки) и комплексной интерпретации поля силы тяжести и деформаций рельефа.

Требование максимального учета имеющейся априорной информации о среде мы предлагаем осуществлять двумя путями:

1. путем построения надлежащих модельных представлений (звездные области известной плотности внутри компактных множеств в банаховом пространстве данных);
2. добавлением в функционалы типа невязки в регуляризирующих алгоритмах некоторых стабилизаторов дифференциального вида, собственные функции которых совпадают о собственными функциями исходных операторов.

Обоснование п. 1 осуществлено в [Дубовенко, 2002], а п. 2 – в [Черная, 1999]. Решение конкретных обратных задач методом регуляризации осуществляется по алгоритмам, изложенных в [Регуляризирующие…, 1983] и подобных им – на основе разработок [Дубовенко, 2002; Старостенко и др., 2004].

**7. О применении мониторинга.** Повторяемые измерения гравитационного поля применяют в геодезии, сейсмологии и вулканологии (комплексное определение предвестников землетрясений и извержений), для мониторинга флюидной динамики водных бассейнов (рис. 4), месторождений и подземных хранилищ углеводородов в процессе их эксплуатации. При коррекции методики результаты мониторинга можно распространить и на сферу применения КПВ, указанную в [Собакарь, 1972].

При сравнении данных гравимониторинга месторождения и его аналитической модели обнаруживаемое отклонение наблюденного поля от модели добычи является сигналом к детальному изучению месторождения методами ГИС и сейсмометрии. Из решения обратной задачи гравиметрии по данным мониторинга можно восстановить *общую* картину вариаций плотности (снижение $\Delta g$ обозначает уменьшение объема углеводородов вследствие их до-

[4] Независимость от времени суток, погоды, автоматика, непрерывность, полнота, надежная привязка к сети.

бычи и опускание газо-нефтяного контакта, увеличение $\Delta g$ – поднятие уровня пластовых вод), но не абсолютные значения плотностей.

Гравитационный мониторинг миграции $CO_2$ в месторождениях углеводородов основан на снижении их объемной плотности при нагнетании $CO_2$ в месторождение. Так, согласно [Gasperikova, Hoversten, 2008], 1-км фронт флюида $CO_2$ внутри 20-метрового пласта соли на глубине 1,9 км в условиях 30% насыщения $CO_2$ и 70% насыщения раствором соли генерирует на поверхности гравианомалию 10 мГал. Решение прямой пространственной задачи с помощью [Старостенко и др., 2004] позволяет по данным микрогравиметрического мониторинга в процессе нагнетания жидкостей в подземные хранилища выявить их распределение и характер миграции по распределению плотностей.

Большие перспективы имеет решение сопряженной обратной задачи – истолкование временных вариаций гравианомалий, возникающих вследствие изменения положения водонефтяного контакта либо уровня пластовых вод в недрах либо скважинах. Его можно использовать как недорогой способ гравитационного мониторинга подземных экосистем мегаполисов и решения иных геоэкологических задач (отслеживании последствий наводнений, оползней, динамики загрязнений подземных бассейнов и т.п.).

Выражаем искренню благодарность академику В.И. Старостенко за глубокую дискуссию, содействовавшую значительному углублению и пониманию вопросов данной статьи.

**Список литературы**

*Алексидзе М.А.* Решение некоторых основных задач гравиметрии. – Тб.: Мецниереба, 1985. – 412 с.

*Болотнова Л. А.* Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект / В. В. Филатов, Л. А. Болотнова // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. – Г., 2007. – С. 43-44;

*Бычков С.Г.* К вопросу о вычислении аномаллий силы тяжести в редукции Буге// // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. - Г., 2007. - С. 73-77.

*Двуліт П.Д.* Методи врахування впливу геофізичних факторів на варіації гравітаційного поля Землі. – Дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01. / Львівська політехніка. – Львів, 1999. – 225 с.

*Дубовенко Ю.І.* Відновлення контактної границі в шаруватому середовищі // Геофіз. журн.– 2002. – **24**, № 6. – С. 36-41.

Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецовой, К.Е. Веселова. – 2-е изд. – М.: Недра, 1990. – 607 с.

*Лоссовский Э. К.* О философии чистой априорной математики как главного конструктивного опорного раздела современного теоретического естествознания: обзор // Геофиз. журн.– 2006. – **28**, № 2. – С. 80-93.

*Лубков М.В*. О влиянии крупномасштабных неоднородностей мантии на суточные числа Лява // Геофиз. журн. – 2011. – 33, № 1. – (в печати).

*Тихонов А.Н., Гоначарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. – М.: Наука, 1983. – 200 с.

*Собакарь Г.Т.* Квазипериодические вариации силы тяжести Земли, их природа и научно-прикладное значение // Геофиз. сб. АН УССР. – Вып. 46. – 1972. – С. 31-42.

*Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Павлюк Е.В., Шарыпанов В.М.* Об автоматизированном вводе в компьютер изображений геолого-геофизических карт с разрывами 1-го рода и визуализации в интерактивном режиме 3-хмерных геофизических моделей и их полей // Геофиз. журн. – 2004. – **26**, № 1. – С. 3-13.

*Старостенко В. И., Легостаева О. В.* Прямая задача гравиметрии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы // Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 31-44.

*Черная О.А*. Исследование обратных задач теории логарифмического потенциала для тел, близких к заданным: Автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук: 04.00.22. / ИГФ НАНУ. – Киев, 1999. – 26 с.

*Юргин О.В.* Высокоточная гравиразведка при измерении гравитационных эффектов малоглубинного происхождения: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – 25.0010. Пермь, 2006. – 26 с. [Электрон. ресурс]. Режим дост.: http://info.dgtu.donetsk.ua/el_izdan/geolog/news/35_2009-01-13_11-54-38/ugin.pdf . – 04.2010. Назва з файлу.

*Юркина М.И.* Определение измерений гравитационного поля и вертикальных движений земной коры по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям // Геодезия и картография. – М., 1978, № 4. – С. 30-35.

*Andò B., Carbone D.* A test on a neuro-fuzzy algorithm used to reduce continuous gravity records for the effect of meteorological parameters // Physics of the Earth and planetary interiors. – 2004. – **142**. – P. 37-47.

*Battaglia M., Gottsmann J., Carbone D., Fernandez J*. 4D volcano gravimetry // Geophysics. – 2008. – **73**, №. 6. – P. WA3-WA18.

*Bonvalot S., Diament M., Gabalda G*. Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones // Geophysical Journ. Int. – 1998. – **135**. – P. 470-494.

*Davis K., Li Y., Batzle M*. Time-lapse gravity monitoring: a systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery // Geophysics. – 2008. – **73**, № 6. – P. WA61-WA69.

*Gasperikova E., Hoversten G.M*. Gravity monitoring of $CO_2$ movement during sequestration: model studies // Geophysics. – 2008. – **73**, № 6. – P. WA105-WA112.

*Geophysics*. – 2008. – **73**, № 6. Special Section. – P. WA1-WA180.

*Gettings P., Chapman D.S., Allis R*. Techniques, analysis and noise in a Salt Lake Valley 4D gravity experiment // Geophysics. – 2008. – **73**, № 6. – P. WA71-WA82.

*Williams-Jones G., Rymer H., Mauri G., Gottsmann J., Poland M., Carbone D.* Toward continuous 4D microgravity monitoring of volcanoes // Geophysics. – 2008. – **73**, № 6. – P. WA19-WA28.